

文章编号: 0258-7025(2003)06-0559-03

# 光纤共振测微振动的研究

郭晓金, 殷宗敏, 刘惊惊, 周正利

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要** 提出了一种利用光纤的共振来测微振动的新方法, 从理论上阐述了其原理并取得了实验数据。最后展望了其应用前景。

**关键词** 精密工程测量; 光纤共振; 固有频率; 在线检测

**中图分类号** TN 253      **文献标识码** A

## Study on Measuring Micro Vibration Based on the Principle of Optical Fiber Resonance

GUO Xiao-jin, YIN Zong-min, LIU Jing-jing, ZHOU Zheng-li

(National Laboratory on Local Fiber-optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** A new method of measuring micro vibration was put forward based on the principle of optical fiber resonance. The principle was given and some data from experimentation were got.

**Key words** precision engineering measurement; optical fiber resonance; inherent frequency; check on line

### 1 引 言

用石英为主要材料做成的弹性光纤具有振动的特性: 当一端固定, 而另一端为自由状态时, 光纤就具有固定的振动频率。当材料不同, 或者光纤的长度和直径变化时, 这种固有的频率也随着变化。我们可以利用光纤的这种特性来测量具有固定频率的物体的振动<sup>[1]</sup>。

### 2 光纤振动原理

细长杆作垂直于轴线方向的振动时, 其主要变形形式是弯曲变形, 通常称为横向振动或弯曲, 简称梁振动<sup>[2]</sup>。光纤的横向振动亦是梁振动。

当一端固定而另一端为自由端时, 称为悬垂梁。下面我们讨论悬垂梁结构的光纤振动频率。

如图 1 所示, 以  $y(x, t)$  表示光纤的横向位移, 它同样是截面位置  $x$  和时间  $t$  的二元函数。以  $\rho$  为光

纤的单位体积质量,  $EI(x)$  为截面抗弯刚度,  $I(x)$  为横截面对中心主轴的惯性矩, 横截面积为  $A(x)$ , 光纤上作用有单位长度分布力  $F(x, t)$ 。

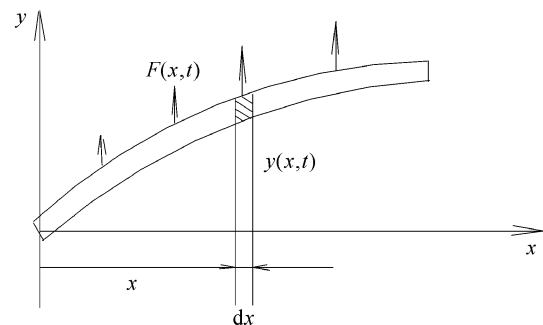


图 1 微弯光纤的受力

Fig. 1 Force on the bending optical fiber

取微段  $dx$ , 上面有剪力  $Q(x, t)$ , 弯矩  $M(x, t)$  和作用力  $F(x, t)$ , 如图 2 所示。图中所有力均按正方向表示。根据牛顿运动定律, 在  $y$  方向的运动方程为

收稿日期: 2002-03-19; 收到修改稿日期: 2002-04-12

作者简介: 郭晓金(1974—), 男, 上海交通大学博士研究生。主要研究方向为光学器件及光纤在通讯、生物传感等方面的应用。E-mail: guoxiaojin@sina.com

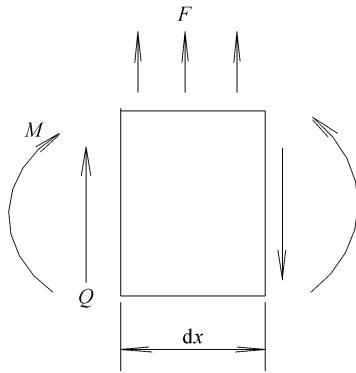


图 2 微段光纤元 dx 的受力  
Fig. 2 Force on the optical fiber segment dx

$$Q - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) + F dx = \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \quad (1)$$

当  $F(x, t) = 0$  即光纤自由振动时, 可得偏微分振动方程

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

根据系统具有与时间无关而确定的振型的特性, 可设(2)式的解为

$$y(x, t) = Y(x)T(t) \quad (3)$$

经推导后得

$$Y(x) = A \sin kx + B \cos kx + C \sinh kx + D \cosh kx \quad (4)$$

这就是光纤振动的振型函数。

对于一端固定的光纤(如图 1), 光纤振动的端点条件为

$$\begin{cases} x = 0, Y(0) = 0, Y'(0) = 0 \\ x = l, Y''(l) = 0, Y'''(l) = 0 \end{cases}$$

代入(4)式, 得

$$\begin{cases} C(\sin kl + \sinh kl) + D(\cos kl + \cosh kl) = 0 \\ C(\cos kl + \cosh kl) - D(\sin kl - \sinh kl) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $B = -D, A = -C$ , 具有非零解的条件为

$$\begin{vmatrix} \sin kl + \sinh kl & \cos kl + \cosh kl \\ \cos kl + \cosh kl & -\sin kl + \sinh kl \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

展开简化后的频率方程为

$$\cos kl \cosh kl = -1 \quad (7)$$

式(7)的根可用作图法求出, 以  $kl$  为横坐标, 作  $\cos kl$  和  $-1/\cosh kl$  的曲线, 可得光纤的固有基频率

$$p_1 = \frac{(k_1 l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \frac{(1.875)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \frac{3.515}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (8)$$

对于等截面光纤, 截面抗弯刚度  $EI$  是常量。因此对

于不同的密度和长度的等截面光纤, 就可以用公式(8)计算其固有的振动频率。

### 3 光纤共振原理

振动系统在策动力的持续作用下发生的振动称为受迫振动。

稳定受迫振动的形成和共振的发生, 从功和能的角度来说, 在受迫振动过程中, 始终有外加的策动力作用。通过策动力对振动系统做功, 外界与系统相互交换能量。由于策动力是一种周期性外力, 即在受迫振动的一个周期内, 只有当策动力方向与振动物体运动方向(即速度方向)一致时, 策动力对系统做正功, 外界向系统提供能量; 而与振动物体运动方向相反时, 策动力对系统做负功, 系统付出能量。振动开始时, 系统获得的净能量越来越多, 振动越来越强烈, 振幅  $A$  越来越大, 速度也因速度振幅  $A\omega$  趋大而随之增加。另一方面, 由于阻尼力一般随速度的增加而增加, 所以振动加强时, 因阻尼而损耗的能量也要增多。当外力对系统所做的功恰好补偿系统因阻尼而损耗的能量时, 系统的机械能就保持不变, 从此, 系统的振动就稳定下来, 成为等幅振动。显然, 如果撤去外加的策动力, 振动能量又将减小而成为阻尼振动。若外加的策动力的圆频率和系统的圆频率相等, 则稳定受迫振动的振幅最大, 即发生共振。

共振光纤由单根光纤构成, 其一端固定, 另一端自由振动, 组成光纤共振系统。该系统可以将微小的振动放大, 它的灵敏度非常高, 可以将  $2 \times 10^{-2}$  mm 的微振动放大到 10 mm。

### 4 实 验

截取一定长度的光纤, 组成光纤共振系统。调节振动台的振动频率和振幅, 可得到最大光纤共振频率。理论上, 这就是光纤的固有基频。

下面是长度为 50 mm 的光纤共振实验数据。

(1) 振动台振幅为 0.25 mm

振动台的振动频率/Hz	共振光纤的振幅/mm
60	0.0
80	1.0
85	2.0
90	6.5
95	7.5

100	7.5
105	7.0
110	1.5
115	0.0
120	0.0

(2) 振动台频率为 100 Hz

振动台的振幅/mm	共振光纤的振幅/mm
0.04	1.5
0.08	2.0
0.12	3.0
0.16	4.5
0.20	5.5
0.25	7.5

### 5 应用前景

利用光纤的这种共振特性,可以用来测量物体的微振动,特别可以用于一些电磁场较强或对人体有害的场合。作为一个例子,可以看一下大型发电机的情况。发电机由于其大工作量及连续运作特性,使得发电机的内部定子很容易产生各种故障,由于内部的高电压(接近 20 kV)以及强磁场,使得普通的检测技术难以应用,而一般的感应器也无法在发电机中得以加载。维修工作也只能在不知发电机内部情况的条件下,进行一些基本的维护工作,为了防止重大事故并根据通常的工作年限,国内一般三年左右就要进行停止运行检修了,有的不能修复的则对发电机进行淘汰。因此寻求一种全新的在线检

测技术显得尤为重要<sup>[3]</sup>。

对于我们的光纤共振系统,在振动光纤的固定端输入光,那么在振动端就会看到一条光线,这就是被放大的振幅,用 CCD 图像采集系统就可以实现远距离检测。

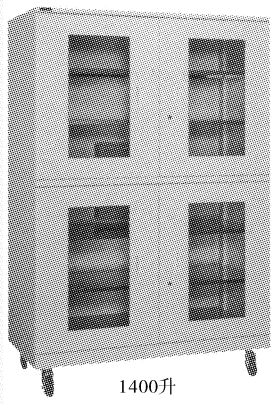
根据对发电机组振动的模拟,正常状态下振动极小,振幅约为 0.02~0.05 mm,而临界异常状态下振幅为 0.2~0.25 mm。正常情况下,发电机组的振动是稳定的。交流电的频率是 50 Hz,倍频后为 100 Hz。因此,可以选择固有频率为 100 Hz 的光纤来产生共振,以检测发电机的振动。实验验证此方法是可行的。

### 6 结 论

根据理论分析和实验可以看出,利用光纤共振的方法来测微振动是可行的,而且设计简单,费用低廉,可用于特殊的场合,具有广阔的应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 Yin Zongmin, Zhou Zhengli, Liu Jingjing. Measuring micro vibration using the principle of optical fiber resonance [P]. Patented Invention (open number CN314586A), 2001
- 2 Guo Yinglong. Mechanical Dynamics [M]. Beijing: Hydroelectricity Press, 1994, 6. 108~117 (in Chinese)
- 3 Emerging Technologies Working Group, Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems: a review [J]. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1994, 9(4):1778~1788



1400升

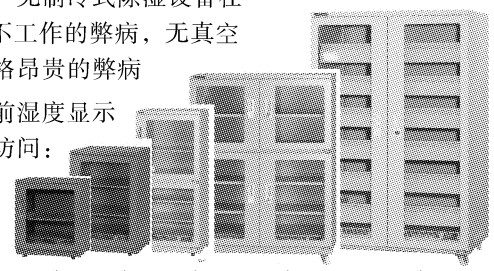
## 光学器材防潮防霉防氧化必备

### 卡特曼常温自动干燥箱

高可靠  
全自动  
免维护

常温自动干燥, 全年高效除湿, 无制冷式除湿设备在气温25℃效果不佳, 20℃以下不工作的弊病, 无真空干燥箱使用不便, 噪音大, 价格昂贵的弊病  
箱内湿度设定, 智能控制, 当前湿度显示  
规格多种, 欢迎垂询, 详情请访问:

[www.autodry.net](http://www.autodry.net)



54升 70升 105升 320升 470升

### 卡特曼(成都)电子有限公司

成都市均隆街59号 邮编: 610021 电话: 028-84463888 传真: 028-84457827